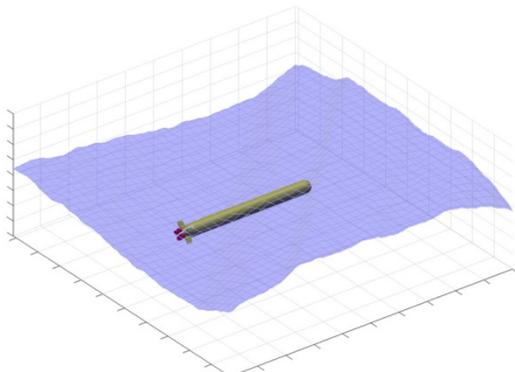


環境変化に対処する自律型無人ビークルの適応制御技術

Adaptive Control of Autonomous Unmanned Vehicle in the Presence of Environmental Variation



西田 周平*¹
Shuhei Nishida

江口 和樹*²
Kazuki Eguchi

彌城 祐亮*¹
Yusuke Yashiro

神代 明暢*¹
Akinobu Koshiro

自律型無人ビークルは、変化する環境の中、しばしば操作者の手が届かない場所で運用されるため、外乱や特性変化に応じてパラメータなどを自動で調整する機能が求められている。そこで、三菱重工業株式会社(以下、当社)では、既存の制御系に自動調整機能を追加できる適応制御器の開発に取り組んでいる。本報では、本技術の概要と、波浪環境下を航走する自律型無人潜水機の揺動抑制を例題とした、シミュレーション検証の結果について説明する。

1. はじめに

近年、高まる省人化へのニーズを背景に、自律型無人航空機(AAV: Autonomous Aerial Vehicle)、自律型無人潜水機(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)、自律型無人水上艇(ASV: Autonomous Surface Vehicle)、自律型無人地上車両(AGV: Automated Guided Vehicle)といった自律型無人ビークルの開発が加速している。自律型無人ビークルには測量、調査、点検、物流などの用途があり、様々な分野で活躍が期待されている。

自律型無人ビークルを運用する際には、外乱や特性変化が問題となる場合がある。例えば、AAV であれば風や搬送物等の重量変化、AUV であれば波浪や海水温度、海水塩分濃度の変化、ASV であれば波浪、AGV であれば路面状況の変化などが考えられるが、これらに対して都度パラメータなどの再調整が必要となると製品の自律性や利便性が制限される。特に、自律型無人ビークルを長時間・長距離のミッションで運用する場合、ビークルを一度帰投させて再調整するのは大きなロスとなる。また、電波の届かない山間部などを航行する AAV や水中を航走する AUV では、操作者が遠隔で調整を行うことも難しいため、外乱や特性変化に自動で対処する機能が求められる。

本報では AUV を例に、外乱や特性変化に応じて自動調整を行う適応制御機能の開発について述べる。AUV はオペレータによる操作を介せず自律的に水中で活動でき、パイプラインや通信用海底ケーブルの点検、深海探査など利用の拡大が期待されている。また、航走中は海水塩分濃度の違いや、ペイロード投下等による浮力バランスの変化、波浪、舵故障など、様々な外乱や、特性変化が想定されるため、適応制御を実装することで、運動のより精密な制御やより複雑なミッションへの適用を目指す。

適応制御における代表的な手法にモデル規範型適応制御(MRACS; Model Reference Adaptive Control)がある。近年、MRACS において課題とされていた、ロバスト性と適応速度の両立を可能とする手法として L1 適応制御⁽¹⁾が提案されている。L1 適応制御は、MRACS にローパス

*1 デジタルイノベーション本部 CIS 部

*2 デジタルイノベーション本部 CIS 部 主席技師 工博

フィルタを組み込むことで、適応ループと推定ループの帯域を分離し、変化が早い外乱や特性変化を推定する場合でも、システムのロバスト性に悪影響を及ぼす高周波の適応入力信号が発生しないようにしたもので、航空機などに適用されている⁽²⁾。

本報では、AUV の姿勢制御系に適応制御機能を追加するため、縦(ピッチ)運動と横(ロール、ヨー)運動それぞれを対象に、L1 適応制御器を設計した。これらの適応制御器は、PID 制御器など既存の姿勢制御器に前置することで、外乱や特性変化に応じて制御入力を調整することができる。さらに不規則波中での AUV の揺動抑制制御を例題としたシミュレーションにて、開発した適応制御器の性能を検証した。

2. AUV 運動モデル

図1に示す船尾スラスターと船尾X舵を備えた AUV を考える。AUV の6自由度運動方程式は、巡航速度一定や機体の対称性など、適切な仮定のもとで線形化すると縦運動と横運動に分離することができる。

AUV はロール角、ピッチ角、ヨー角をそれぞれ独立な2自由度 PID 制御器により制御されているとする。この様子を図2に示す。本報では、縦運動モデルとピッチ角制御器及び横運動モデルとロール角、ヨー角制御器の閉ループ系を規範モデルとして L1 適応制御器を設計する。これにより、既存の PID 制御器への指令値を調整することで外乱や特性変化の影響を相殺する適応制御器が設計できる。

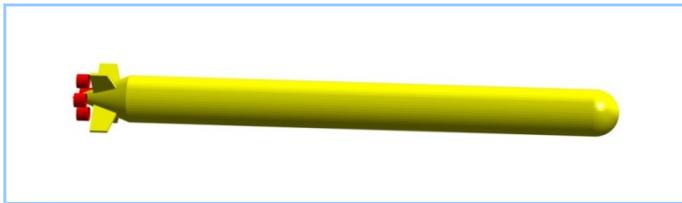


図1 AUV のイメージ図

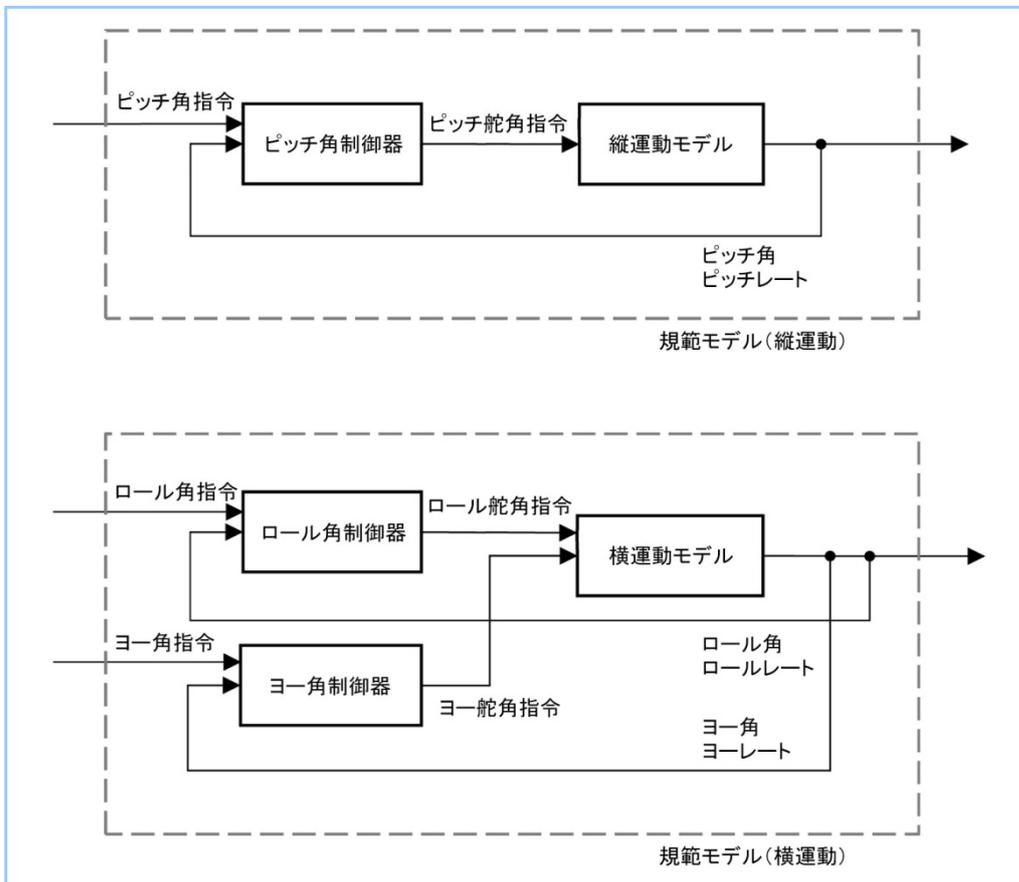


図2 規範モデル

3. L1 適応制御系

L1 適応制御器は図3に示すように、状態予測器、適応則、制御則で構成される。以下で各構成要素について簡単に説明する。

状態予測器では、前節で説明した図2の閉ループ系で構成される規範モデルを用いて AUV の状態推定を行う。推定する状態変数 $x(t)$ は姿勢角、速度、角速度と各 PID 制御器の積分量からなり、推定式には、状態変数の推定量 $\hat{x}(t)$ の他に、外乱や特性変化により発生する不確かさの推定量 $\hat{\sigma}(t)$ が含まれている。

適応則では、状態予測器での推定誤差 $\tilde{x}(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ をもとに $\hat{\sigma}(t)$ を計算する。 $\hat{\sigma}(t)$ は時間に関する区分定数関数で、更新周期 T_s ごとに推定誤差 $\tilde{x}(t)$ を打ち消す値が設定される。

制御則では、システムに作用する外乱や特性変化の影響を相殺するため、指令値 $r(t)$ から不確かさの推定量である $\hat{\sigma}(t)$ を差し引いたうえで、ローパスフィルタを通して高周波成分を遮断し、適応入力 $u(t)$ として出力する。

以上に述べた L1 適応制御器を AUV の縦運動と横運動それぞれに対して設計し、既存のフィードバック制御ループに挿入すると図4の適応制御系が得られる。このとき、縦運動の適応制御器はピッチ角指令を、横運動の適応制御器がロール指令とヨー指令を整形することで、外乱や特性変化に応じた自動調整を行っている。AUV の L1 適応制御設計の詳細については、文献⁽³⁾に記載する。

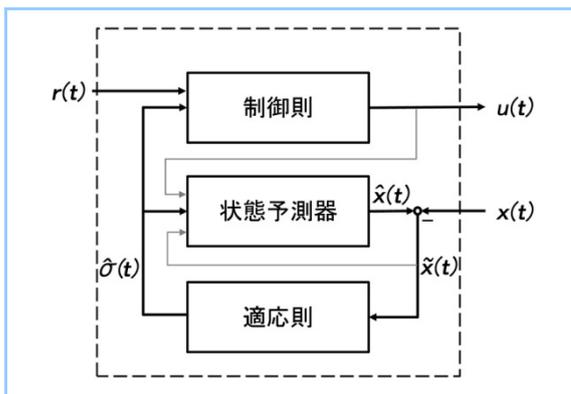


図3 L1 適応制御器

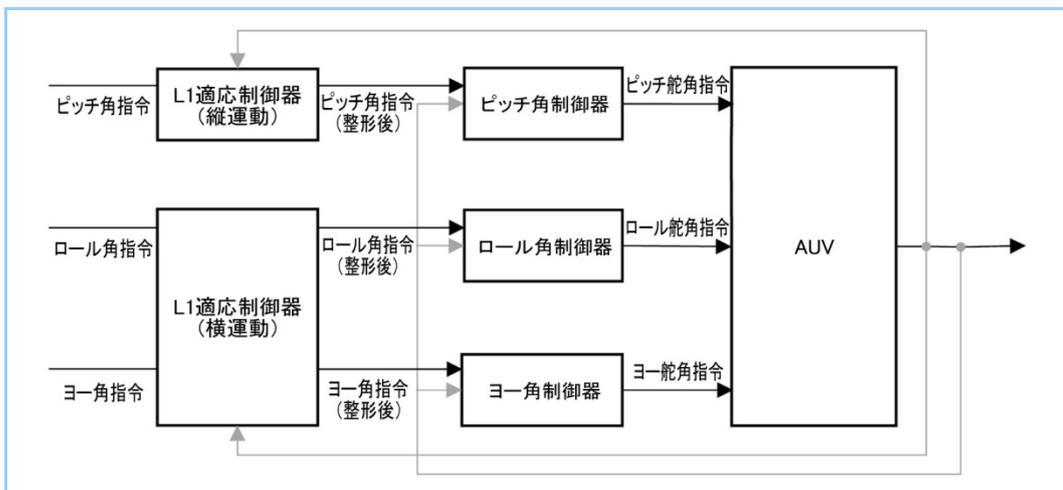


図4 適応制御系

4. シミュレーション検証

水面付近を航走するAUVの波浪による揺動の抑制を例題に、設計したL1適応制御器の性能を検証した。シミュレーションでは、AUVの6自由度非線形運動モデルと、不規則波に含まれる周波数ごとの成分波がもつ、エネルギーの割合を示す波スペクトルを用いて、不規則波中を航走するAUVの運動を再現した。

検証に用いた航走シナリオの概略を図5に示す。AUVは深度2m付近を速力4kt、ロール、ピッチ、ヨー角0度を目標に航走する。波浪については、外洋での波浪の模擬に適したスペクトルとして、国際船舶海洋構造会議(ISSC)が提案したISSCスペクトルに基づき素成波を重ね合わせることで、2次元不規則波を再現した。波の方向は航走線に対して45度に向き、有義波高は3.72m、有義波周期は12.5秒に設定した。

以上に述べた条件でシミュレーションを行ったときのAUVの姿勢角応答を図6に示す。実線と破線はそれぞれL1適応制御により指令値を整形した場合と、しなかった場合の結果であり、整形によりロール、ピッチ、ヨーいずれについても、振動が抑制されていることがわかる。また、姿勢角振動のピーク値で比較すると、ピッチ角で41%、ロール角で32%、ヨー角で46%の揺動抑制効果を確認できた。



図5 航走シナリオ

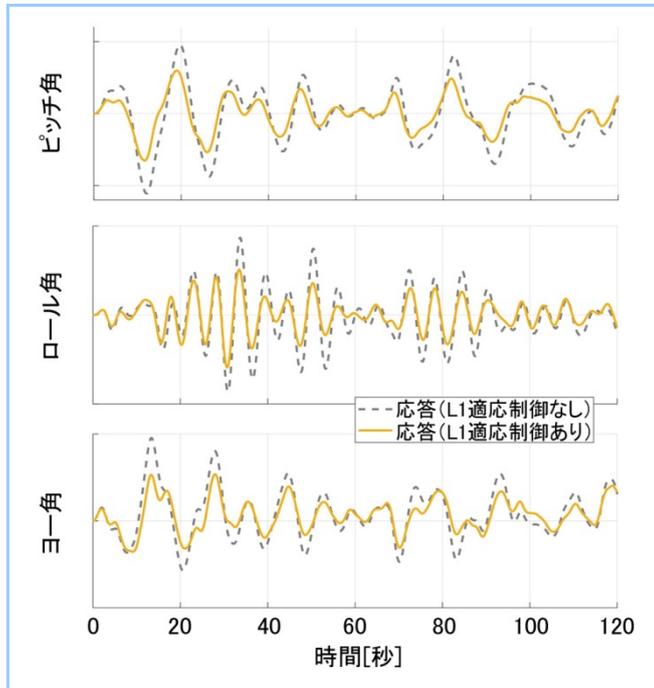


図6 シミュレーション結果

5. まとめ

本報ではロール、ピッチ、ヨーを独立に制御する2自由度 PID 制御系に対して、目標信号の整形により外乱や動特性変化に対処する L1 適応制御器を設計した。更に、6自由度の非線形運動モデルを用いた航走シミュレーションにおいて、スペクトル分解により2次元不規則波を再現し、設計した L1 適応制御器が波浪揺動抑制に有効であることを確認した。

本報の成果は、AAV, AUV, ASV, AGV といった自律型無人ビークル製品の性能向上に貢献できるものと考えており、当社製品への適用を推進していく。

参考文献

- (1) Xargay, E. et al., L1 Adaptive Controller for Multi-Input Multi-Output Systems in the Presence of Nonlinear Unmatched Uncertainties, In Proceedings of the 2010 American Control Conference (2010) p.876-879
- (2) Gregory, I. et al., L1 Adaptive Control Design for NASA AirSTAR Flight Test Vehicle, In Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference (2009)
- (3) 西田周平ほか, L1 適応制御による AUV の波浪揺動抑制, 第 66 回 自動制御連合講演会講演論文集 (2023)